心理科学进展 2018, Vol. 26, No. 8, 1349–1364
Advances in Psychological Science DOI: 10.3724/SP.J.1042.2018.01349

·研究方法(Research Method)·

利用时频分析研究非相位锁定脑电活动*

武 侠[1] 钟楚鹏[1] 丁玉珑[1] 曲 折[1]
(中山大学心理系, 广州 510006)

摘 要 时频分析技术自20世纪80年代被引入到心理学脑电数据分析领域以来, 克服了传统的时域ERP方法只能分析相位锁定成分的缺陷, 可以帮助研究者挖掘到脑电信号中非相位锁定的成分。在心理学领域, 应用最多的时频分析方法是小波变换和Hilbert变换, 而能量、相位一致性和耦合是三个最常用的分析指标。研究者利用不同的分析指标来揭示不同的心智过程。不同频段的能量被认为体现了不同的认知过程, 如α能量被发现与注意选择性有关, 而γ能量则与特征整合相关。相位一致性常被用于讨论ERP产生的机制。耦合则通常说明了长距离脑区之间的信息交流以及高级脑区对低级脑区的认知控制, 在完成各种复杂认知任务的时候会表现出不同的耦合模式。

关键词 时频分析; 小波变换; Hilbert变换; 能量; 相位一致性; 耦合
分类号 B845

1 引言

Berger于1929年第一次记录了人类头皮处的脑电活动(Electroencephalography, EEG, Berger, 1929), 揭开了对人类EEG研究的序幕。随着时间的推进, 研究者们的研究兴趣逐渐从直接研究自发脑电活动转移到了研究事件相关电位(Event-Related Potentials, ERPs)。在1960年代以后, 人们主要通过使用时域内ERP分析方法来探讨认知活动和脑电活动之间的关系 (Bastiaansen, Mazaheri, & Jensen, 2012)。时域ERP分析方法假设每一次事件诱发的电活动类似, 而自发噪音则是随机的。时域ERP分析方法把每一次事件出现的时刻作为数据分析的标准时刻点, 将每一个试次(trial)的EEG信号按照标准时刻点对齐后叠加求平均。不同试次的噪音会在叠加平均的过程中相互抵消, 叠加平均后的脑电信号就是事件诱发的脑电活动, 代表了大脑对该事件的认知加工过程(Luck, 2005; Woodman, 2010)。

1980年代以来, 越来越多的研究者意识到时域ERP成分只是一种特定类型的事件相关脑电信号。事件发生后, 大脑对事件认知加工所对应的脑电活动中还有其他类型的事件相关脑电活动。研究者发现, 在事件发生后大脑内与事件加工相关的EEG活动有可能是以下几种类型: 频率反应(frequency response, Ijspeert, 2008), 振幅反应(amplitude response, Klimesch, 2012; Tallon-Baudry & Bertrand, 1999), 相位重置(phase resetting, Gruber & Müller, 2005; Klimesch et al., 2004), 新增成分(additive response, Mäkinen, Tiitinen, & May, 2005; Mazaheri & Picton, 2005)。

图1列出了上述四类大脑对事件的反应类型。(1)频率反应(图1A)是某频率的自发EEG活动在事件出现后变化了振荡频率, 这一类大脑活动多见于单细胞放电或者人们在有节律运动的时候中枢系统某节律细胞的活动。(2)振幅反应(图1B)是事件发生后某频率EEG自发电活动能量增加(或减小), 每个试次中该频率的能量都有所增加(或减小), 不过每个试次事件相关电活动相位是随机的, 叠加平均时相互抵消掉了, ERP平均波形捕捉不到此类事件相关脑电活动。(3)相位重置(图1C)是所有试次的相位都会因事件出现而变

收稿日期: 2017-10-16
* 国家自然科学基金项目(No. 31471070, 31271190)。
通信作者: 曲折, E-mail: quzhe@mail.sysu.edu.cn

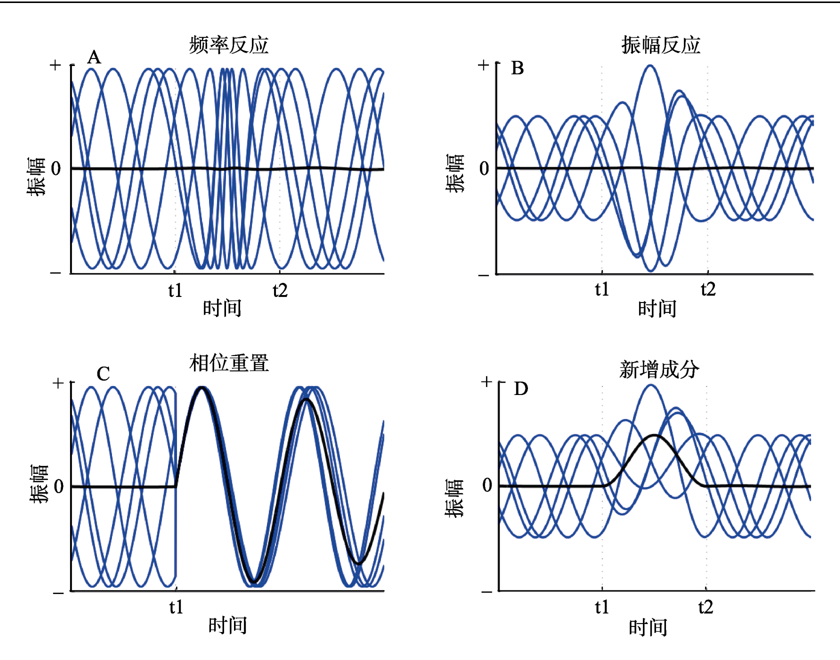


图 1 事件发生后可能的脑电活动变化。A, 频率反应(frequency response), 事件发生后原本脑电自发活动的振荡频率发生了变化; B, 振幅反应(amplitude response), 事件发生后, 原本脑电自发活动的能量发生了变化; C, 相位重置(phase resetting), 事件发生后, 原本脑电自发活动的相位发生了扰动, 相位在试次之间变得一致; D, 新增成分(additive response), 事件发生后, 出现了一种与自发脑电活动无关的新成分, 各试次之间新成分相似。(图摘自维基百科, "Neural oscillation," 2018)

得一致, 这类活动是相位锁定活动。求平均波形时, 此类活动会出现在平均波形中, 这是我们熟知的 ERP 成分。(4)新增成分(图 1D), 即事件发生后每个试次都会出现与自发活动相互独立的新增成分。这些活动的相位相似, 强度相似, 求平均波形时, 也会呈现在平均结果中, 也可以产生我们所熟知的 ERP 成分。

综上, 在事件发生后, 大脑对事件的认知加工过程可能表现为相位锁定的活动和非相位锁定的活动两类, 相位锁定的活动可以通过时域 ERP 分析方法来分析, 而相位不锁定的活动在时域 ERP 分析方法中被当作噪音去除掉了。即使是传统的时域 ERP 平均波形, 也可能有两种产生机制: 相位重置(图 1C)和新增活动(图 1D), 但这两种机制在传统的时域 ERP 分析方法中无法区分。为了弥补时域 ERP 分析方法的这些局限性, 研究者们引入了一种新的信号分析方法, 这就是本文要介绍的时频分析方法。

2 时频分析方法原理简介

研究者从头皮处的电极记录到的脑电信号是一种时域内的信号, 是糅杂了事件诱发的短时暂变信号、自发电活动以及随机噪音等强度随时间变化的信号。为了更加清晰直观地观察脑电信号, 可以通过傅立叶变换将信号从时域变换至频域, 频域内 EEG 活动的各种频率成分可以清晰区分, 不仅更直观, 而且可以对不同频率成分进行独立分析, 给信号分析提供了极大的方便。但实验条件下的 EEG 信号是一种非稳恒信号, 事件诱发的信号有产生和衰减的时间进程。将信号完全转换到频域会失去时变信息, 导致频域结果含义不清, 难以解释。而时频分析则可以在分析频率成分的同时给出时间信息, 使得对时变信号的分析变得直观和容易理解。在结果中包含信号的频域和时域信息的分布被称为时频分布, 对信号做时频分布的分析就是时频分析。

时频分析的算法有很多种, 包括窗口傅立叶变换, 小波变换, Hilbert 变换, Hilbert-Huang 变换, Wigner-Ville 分布等方法(Huang et al., 1998; Torrence & Compo, 1998)。在心理学脑电数据分析领域, 最常用的是小波变换和 Hilbert 变换。小波变换常应用于计算各个波段活动的能量(Mishra, Martínez,

Schroeder, & Hillyard, 2012; Tallon-Baudry & Bertrand, 1999)。对相位的计算中, 则常会用到Hilbert 变换(Canolty et al., 2006; Song, Meng, Chen, Zhou, & Luo, 2014)。窗口傅立叶变换也是一种时频分析算法, 但高频和低频波段信号的分辨率相同, 在心理学脑电数据分析中应用较少。传统的傅立叶变换则是一种频域分析方法, 不适合时变信号的分析。

2.1　傅立叶变换和窗口傅立叶变换

为了形象地说明几种时频分析方法的异同, 本文构造了两段简单的时变信号：第一段(图 2A)的前半段是振幅为 1 的 10 Hz 正弦信号, 后半段是振幅为 1.5 的 20 Hz 余弦信号; 第二段(图 2B)的前半段是振幅为 1.5 的 20 Hz 余弦信号, 后半段是振幅为 1 的 10 Hz 正弦信号。这两段不同时变信号的傅立叶变换结果完全相同(分别见图 2C 和图 2D)。由此可见, 傅立叶变换对于时变信号并不适用。在实际应用中, 傅立叶变换只适用于分析一些能产生相对稳恒的脑电振荡模式的实验数据, 如对稳态视诱发(SSVEP)的分析(Regan, 1966; Norcia, Appelbaum, Ales, Cottereau, & Rossion, 2015; Rossion, Prieto, Boremanse, Kuefner, & van Belle, 2012)。

窗口傅立叶变换, 又叫短时傅立叶变换(short-time Fourier transform, STFT, Allen, 1977), 是在傅立叶变换的基础上, 对算法做了改进, 从而适用于时变信号的分析。具体来说, 是对信号进行分析时, 加了一个短暂的时间窗口, 在窗口内对信号进行傅立叶变换。因为窗口时间短暂, 窗口内的信号可近似看作稳恒信号, 通过傅立叶变换就可以得到短暂窗口内的频率信息, 然后再将时间窗口依次施加于信号中不同的时间位置, 从而获得原信号不同时间位置的频率信息。用窗口傅立叶变换分析图 2A、2B 中的时变信号结果如图 3A 所示。

窗口傅立叶变换中采用的窗口一般是 Hanning 窗、Hamming 窗或者高斯窗口(Pampu, 2011)。选择了窗口后, 窗口长度在信号分析过程中便不再改变(如图 5A), 于是高频和低频信号有相同的时间分辨率和频率分辨率。

脑电研究表明, 低频波段相差数赫兹的频率可能代表了不同的心理功能。比如一项记忆研究中, 阿尔法波段(α, 8~12 Hz)与记忆的提取相关, 而西塔波段(θ, 4~8 Hz)与记忆编码相关(Klimesch, 1999), 两个波段频率只相差数赫兹。对于较高频段, 往往较广频段范围内的信号代表了同一种心理功能, 比如伽马波段(γ, 30 Hz 以上)往往是一大段频率具有同样的认知功能(Siegel, Donner, Oostenveld, Fries, & Engel, 2008)。这就需要在实际分析脑电信号时, 更加希望低频有更高的频率分辨率, 而高频则无需追求特别高的频率分辨率。要实现这样的目的, 需要采用小波变换。

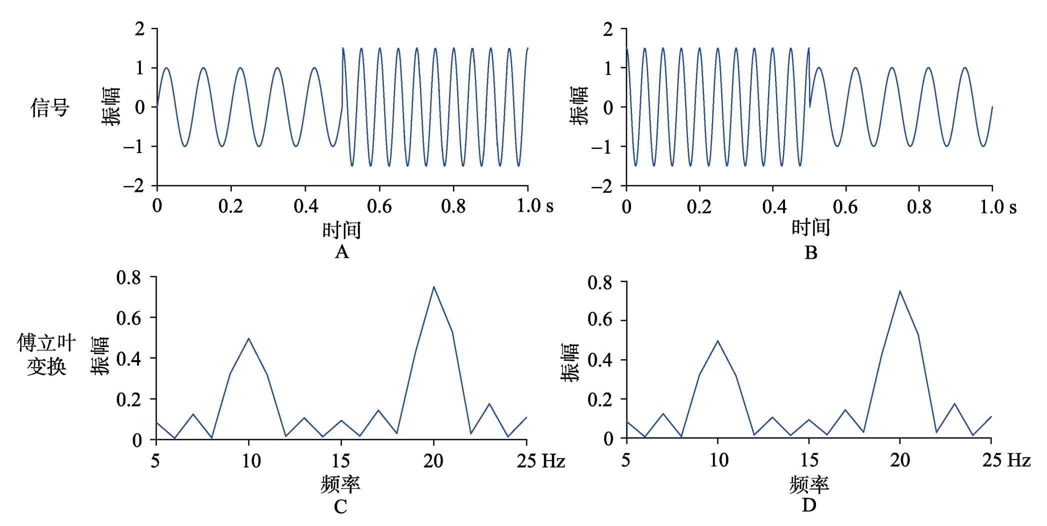


图 2　时变信号的傅立叶变换示意图。A、B 为信号示意图, 其中 A 为前半段为振幅为 1 的 10 Hz 正弦振荡, 后半段为振幅为 1.5 的 20 Hz 余弦振荡; B 为前半段为振幅为 1.5 的 20 Hz 余弦振荡, 后半段为振幅为 1 的 10 Hz 正弦振荡。C、D 分别为 A、B 信号的傅立叶变换结果。

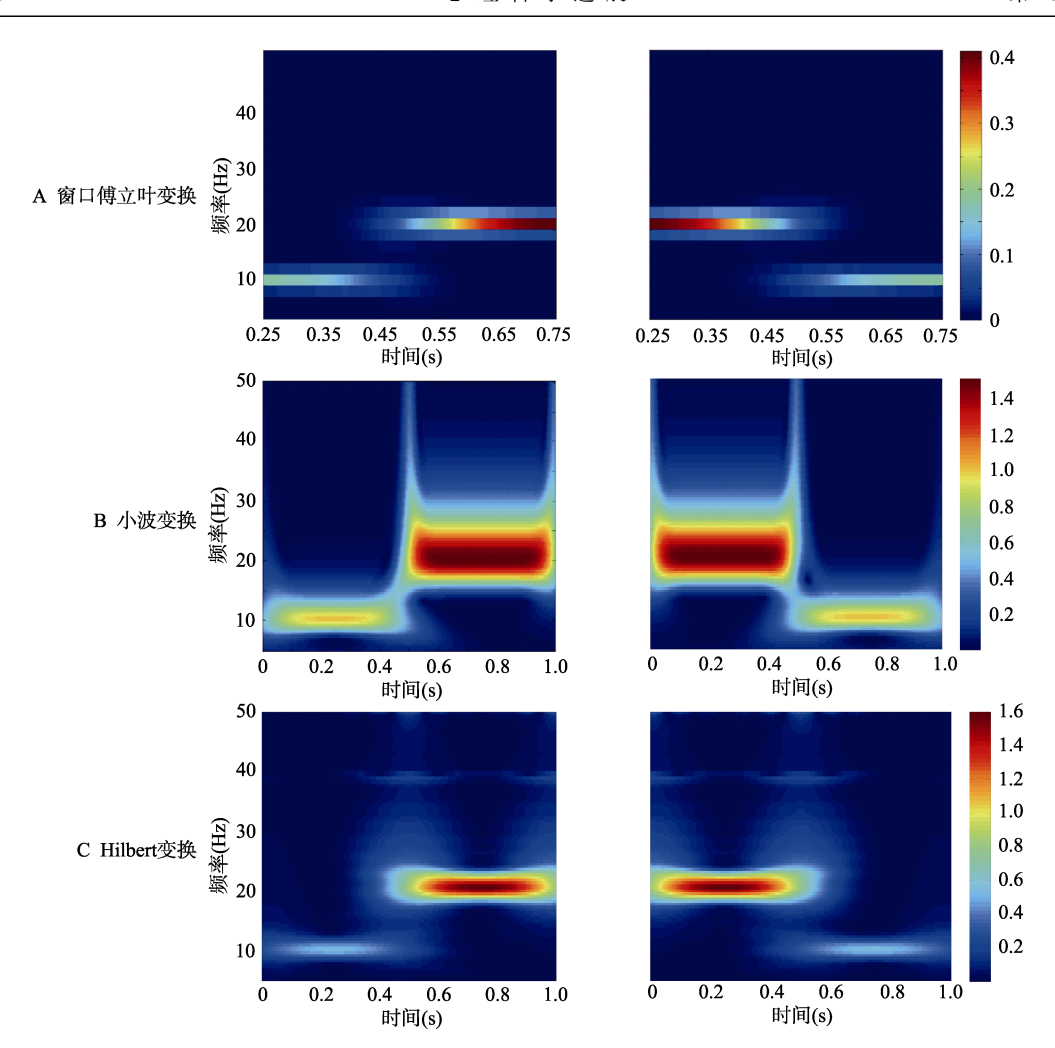


图 3 对图 2 中的两个时变信号的时频分析示意图。A、B、C 分别给出了窗口傅立叶变换、小波变换、Hilbert 变换的分析结果。第一列、第二列分别为对图 2A 和图 2B 信号的分析结果。彩图见电子版，下同。

2.2 小波变换

小波是一种时间长度有限并向两端快速衰减的振荡波形(Vidakovic & Mueller, 1991)。小波的振荡形态有很多种，每一种形态被称为一种母小波 (Lee & Yamamoto, 1994)。构造母小波需满足一定的条件，不同形态的母小波会对分析结果造成影响(Nobach et al., 2007)。所以分析数据时要根据所分析数据的特点，选择合适的母小波(Kharate, Patil, & Bhale, 2007; Ngui, Leong, Hee, & Abdelrhman, 2013)。脑电研究中最常用的是复 morlet 小波分析(连续小波分析，Roach & Mathalon, 2008)。复 Morlet 小波可以看做是由余弦振荡为实部和正弦振荡为虚部构成的复振荡函数加一个高斯窗口组成，正余弦振荡向窗口两端迅速衰减(Bernardino & Santos-Victor, 2005; Lieuw, 2015，图 4)。

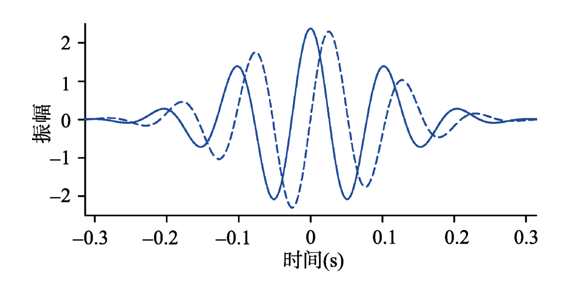


图 4 复 Morlet 小波示意图，实线是小波的实部，虚线是小波的虚部。复 Morlet 小波的实部和虚部相位相差 90 度，都可以看做是正余弦信号加了高斯窗口构成的向两端急剧衰减的振荡信号。

图 5　窗口傅立叶变换和小波变换小波族(wavelet family)子小波对比。A, 窗口傅立叶变换的时间窗口长度固定, 对于高低频信号都有同样的时域和频域分辨率; B, 小波变换高低频的子小波有相同的周期数, 时间窗口长度并不相等。对于低频信号, 时间窗口更长, 时域分辨率更差, 频域分辨率更好; 高频信号则时间窗口短, 时域分辨率好, 频域分辨率差。

信号分析时, Morlet 母小波经过压缩和扩张可生成一个小波族(wavelet family, 图 5B), 不同压缩和扩张程度的小波可以理解为代表着不同“频率”的小波, 然后将小波族的子小波分别与信号做卷积, 从卷积结果中提取出信号的时频能量和相位。各个子小波具有不同的时间长度, “高频”小波的时间长度比“低频”小波更短, 但是两者在各自时间长度内的周期数是一样的。小波分析中低频波段时间窗口长, 频率窗口短, 因而可以得到较高的频率分辨率但时间分辨率较差; 而高频波段, 时间窗口短, 频率窗口长, 因而有较高的时间分辨率和较差的频率分辨率(图 5B)。对图 2 的两个时变信号做小波变换结果如图 3B 所示。

2.3　Hilbert 变换

Hilbert 变换是将信号与 1/(pi×t)做卷积, 使得信号的相位旋转 90 度, 而本身的振幅大小不变(Nobach et al., 2007)。心理学领域的数据分析中, Hilbert 变换的应用亦很广泛(Canolty et al., 2006; Penny, Duzel, Miller, & Ojemann, 2008; Song et al., 2014)。在 EEG 数据分析中, Hilbert 变换主要是通过解析信号的构造来求解信号的能量和相位的。Hilbert 变换常和滤波结合在一起用, 通过无相位偏差的带通滤波将要分析的信号限定在所要分析的较窄频段内, 然后再由 Hilbert 变换求解该频段信号的振幅和相位大小(Song et al., 2014)。一般认为, Hilbert 变换拥有较高的频率分辨率, 而时间分辨率稍差, 在边界处的计算误差(边界效应)比较大。一些研究者采用了信号两端补零和加 Hanning 窗的办法减少 Hilbert 变换的边界效应(Song et al., 2014)。Hilbert 变换对图 2 中的时变信号的分析结果如图 3C 所示。

总之, 窗口傅立叶变换、小波变换以及 Hilbert 变换都可以有效地分析时变信号(如图 3 所示)。有研究者对比了窗口傅立叶变换、小波变换以及 Hilbert 变换对一批脑电数据分析的结果, 发现在三种方法之间并没有实质的差别 (Bruns, 2004)。

3　时频分析的基本计算指标和心理学意义

时频分析技术通过丰富的计算指标揭示脑电中非相位锁定成分的心理意义。不同计算指标帮助揭示认知加工过程的不同方面。这部分内容将简要介绍时频分析用于脑电分析的三大类指标：能量, 相位一致性以及耦合。

3.1　能量(Power)

3.1.1　计算原理

能量是指信号分析结果中某频率成分在某时刻点的能量值, 代表了该频率成分振荡强度(振幅亦可以代表振荡强度, 为能量的平方根)。以小波变换求能量为例, 分析能量前, 首先构造合适的母小波, 母小波由小波核心参数 Q 值决定。感兴趣的频段为低频时, Q 一般选为 5, 或者 3 (Mishra et al., 2012); 若感兴趣的频段为高频时, Q 可以选择为 6 或者 7。也有文献提出可以调节 Q 值的小波变换(Selesnick, 2011)。母小波构造好后, 根据要分析的频段确定具体频率值和对应尺度值, 然后根据尺度值构造子小波。将子小波和信号做卷积运算, 对卷积结果中的小波分析系数求模平方即为能量值, 而系数模则为振幅值。

3.1.2　能量的心理学意义

在数据分析过程中, 时频分析求能量有两种求解顺序, 分别对应不同的事件相关脑电活动(图 6)：一种是先对不同试次的信号叠加平均得到平均波形(ERP), 然后求平均波形的能量(evoked 能量, 代表相位锁定于刺激发生时刻的能量); 另一种是求单个试次的能量, 然后把不同试次的相应时频能量进行叠加平均(包含了 evoked 能量和 induced 能量)。由此可见, 时频分析比传统的时域 ERP 分析方法可以挖掘出更多的事件诱发脑活动,

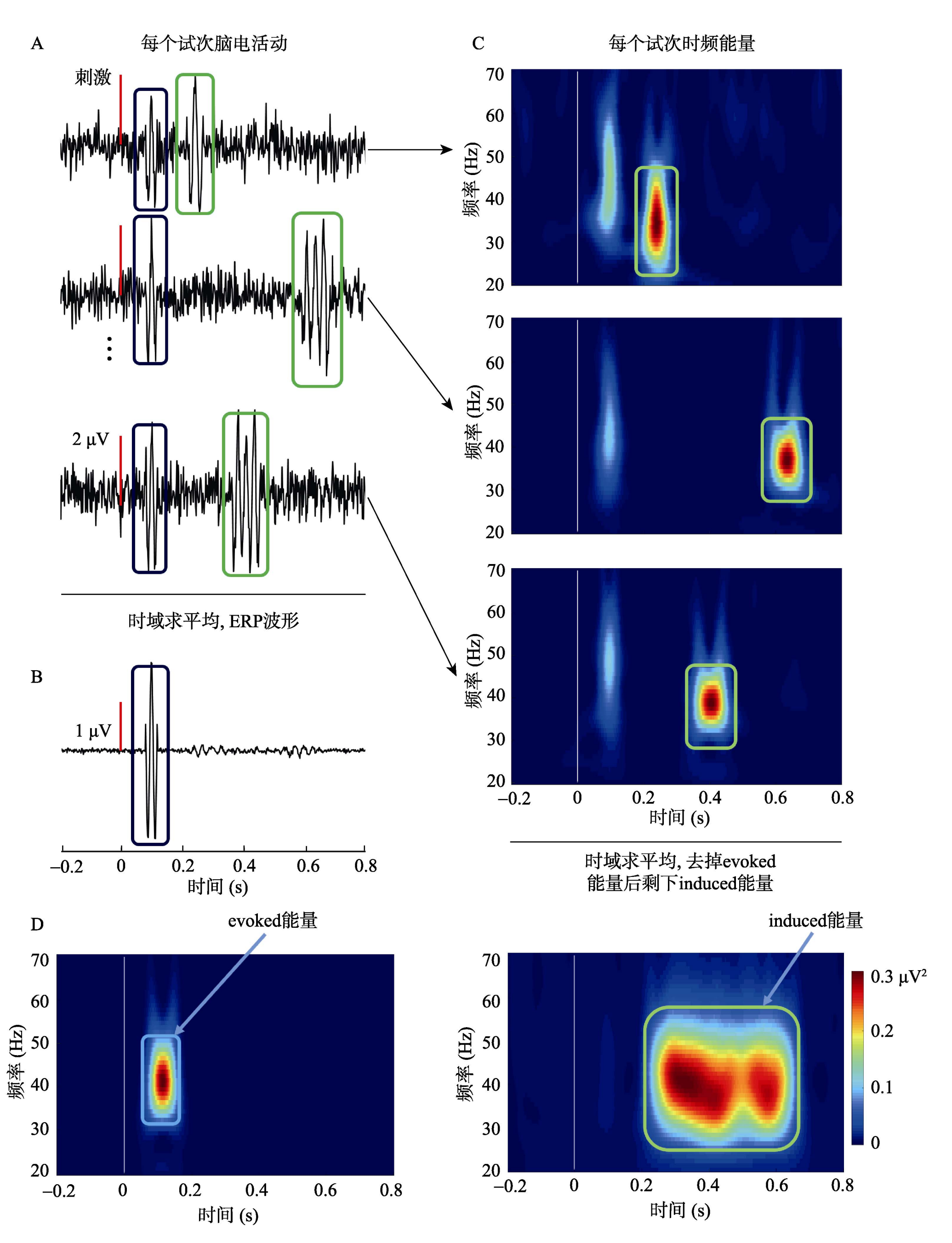


图 6 计算 evoked 能量和 induced 能量示意图, A, 每个试次的γ振荡示意图, 蓝框内为 evoked 活动, 绿框内为 induced 活动; B, 波形叠加平均后的平均振荡波形, 只剩下了 evoked 活动; C, 每个试次的时频能量示意图, 可以看到每个试次的 induced 能量; D, 左侧 evoked 能量是平均波形时频分析的结果, 右侧 induced 能量是单个试次时频能量平均结果减去 evoked 能量的差异值。

弥补了传统方法的局限。在 Tallon-Baudry 和 Bertrand (1999)的研究中, induced γ 活动代表了被试对三角形的整体觉知, 代表了一种对特征的整合, 这是 evoked 能量所无法揭示出来的。后来的研究者使用了不同的刺激, 仍然得到了相似的结论, 刺激之后 200 ms 后出现的非相锁的 induced γ

活动标志着物体的特征整合在一起(Busch, Herrmann, Müller, Lenz, & Gruber, 2006; Goffaux, Mouraux, Desmet, & Rossion, 2004; Gruber, Trujillo-Barreto, Giabbiconi, Valdés-Sosa, & Müller, 2006; Martinovic, Gruber, & Müller, 2007; Tallon-Baudry, 2009)。不仅如此, 也有研究发现 γ 能量在工作记忆中也标志着特征整合的过程(Morgan et al., 2011; Tseng, Chang, Chang, Liang, & Juan, 2016)。

虽然有研究表明, induced γ 活动可能受到微眼动的影响(Yuval-Greenberg, Tomer, Keren, Nelken, & Deouell, 2008; Muthukumaraswamy, 2013), 但大量的研究在使用一些数据分析技术去除了微眼动对研究结果的影响后, 同样发现了特征捆绑过程中 γ 活动的存在(Hassler, Barreto, & Gruber, 2011; Keren, Yuval-Greenberg, & Deouell, 2010)。这说明了刺激出现 200ms 后持续较长时间的 γ 活动与特征捆绑相关, 这种 γ 活动代表了一种将大脑加工的特征信息整合起来的过程(Hassler, Friese, Martens, Trujillo-Barreto, & Gruber, 2013; Makin et al., 2011)。

α 能量是较早被发现和研究最广泛的波段之一。α 能量在清醒闭眼的时候比较显著, 是清醒时大脑后部区域能量最为显著的波段(Valipour, Shaligram, & Kulkarni, 2013)。大量研究发现 α 与注意密切相关, α 能量低预示着注意状态(Sharma & Singh, 2015; Marshall, O'Shea, Jensen, & Bergmann, 2015; Capilla, Schoffelen, Paterson, Thut, & Gross, 2014; Händel, Haarmeier, & Jensen, 2011; Hanslmayr, Gross, Klimesch, & Shapiro, 2011; van Gerven & Jensen, 2009), 比如选择性注意的研究中发现了 α 能量的高低预示着注意选择过程。在使用 Posner 中央线索范式来研究空间选择性注意的文献中, 人们发现线索提示后约 500ms (此时目标尚未出现), 会在提示空间对侧枕区皮层诱发比同侧更低的 α 能量, 代表了对线索提示位置的注意增强(Kelly, Gomez-Ramirez, & Foxe, 2009; Kelly, Lalor, Reilly, & Foxe, 2006; Rihs, Michel, & Thut, 2007; Sauseng et al., 2005; Thut, Nietzel, Brandt, & Pascual-Leone, 2006; Worden, Foxe, Wang, & Simpson, 2000)。不仅如此, 在一项外周 Posner 线索任务中, 无关声音刺激在左右视野空间出现, 也会引起目标出现前线索对侧大脑皮层枕区 α 能量的降低。说明了在外周 Posner 任务中, α 能量的减小同样代表了被试对一侧空间的注意(Störmer, Feng, Martinez, McDonald, & Hillyard, 2016)。除此之外, 在基于特征的注意和基于物体的注意研究中都有类似的发现, 即特征加工相应脑区或者物体加工相应脑区 α 能量的降低代表了对该特征或物体的注意 (Snyder & Foxe, 2010; Knakker, Weiss, & Vidnyánszky, 2015; Fu et al., 2001)。在情绪性注意的研究中, 也有类似的发现, 即 α 能量大小预示着对情绪刺激的注意和抑制(Uusberg, Uibo, Kreegipuu, & Allik, 2013)。

定位于前额中区的 θ 能量则被发现与认知控制功能有关(Cavanagh, Cohen, & Allen, 2009; Cavanagh, Frank, Klein, & Allen, 2010; Womelsdorf, Johnston, Vinck, & Everling, 2010)。比如在 2013 年的一篇研究中, 研究者使用多任务的视觉游戏来训练老年人, 发现多任务视觉游戏训练后, 老年人额中区的 θ 能量以及额中区 θ 相位和枕区的 θ 相位联系增强, 说明了增加的额中区能量对视觉任务的完成有更好的认知控制作用(Anguera et al., 2013)。此外, 有研究发现 β 能量与运动密切相关(Engel & Fries, 2010; Bai et al., 2008; de Lange, Jensen, Bauer, & Toni, 2008; Waldert et al., 2008), 也有一些研究发现 β 能量与被试的注意有关(Gola, Magnuski, Szumska, & Wróbel, 2013; Deiber, Ibañez, Missonnier, Rodriguez, & Giannakopoulos, 2013)。

3.2　相位一致性(Phase Locking Index, PLI)

3.2.1　计算原理

相位一致性(PLI)是对某电极大量试次间相位一致性程度的衡量。相位一致性代表着大量试次在事件发生时刻以及后续较短时间内, 相位在试次间是否一致。如果相位完全一致, PLI 为 1, 相位完全随机, PLI 则为 0。计算时, 将不同试次的某时刻相位用单位向量表示, 然后计算不同试次间该向量的平均值, 原理如图 7。

3.2.2　相位一致性的心理学意义

时域 ERP 成分和相位一致性有密切的关系(Busch, Dubois, & VanRullen, 2009; Mathewson, Gratton, Fabiani, Beck, & Ro, 2009)。相位一致性指标可以和能量指标结合起来, 用于探讨 ERP 产生的机制 (Makeig et al., 2002; Mishra et al., 2012)。如前所述, ERP 成分有两种可能的产生机制: 相位重置(图 1C), 和新增成分(图 1D)。一种区分两种机制的方法是检测刺激出现前后每个试次中的能量以及相位一致性; 如果前后能量没有

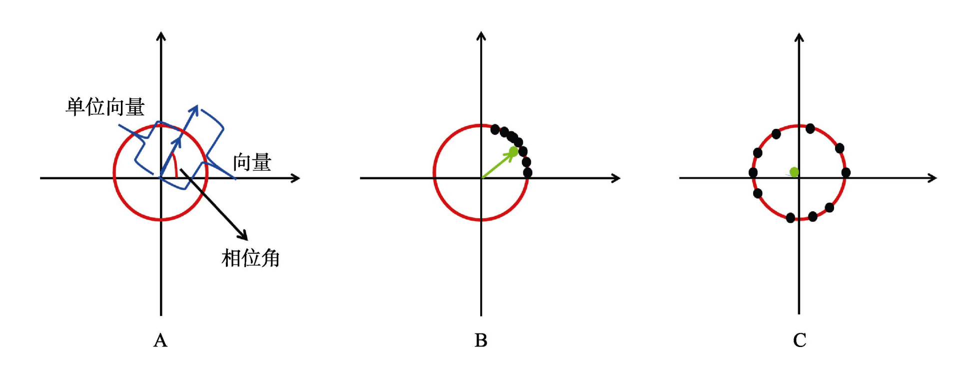


图 7 PLI 计算原理示意图, A, 单个试次某时刻某频率的能量和相位用复平面内向量表示, 圆代表单位圆, 向量在单位圆上的投影为只表示相位大小的单位向量; B, 若干试次的单位向量(黑色的点为单位向量的末端, 省去了箭头), 这些单位向量集中在第一象限, 平均向量(绿色)的大小(PLI)接近于 1; C, 若干试次的单位向量平均分散在 4 个象限, 平均向量的大小(PLI)接近于 0。

明显不同, 但是平均结果中却有明显的 ERP 成分, 那么便可以肯定相锁机制的存在; 如果刺激出现后单个试次的能量有明显增加, 且有中等强度的相位锁定性, 那么可能说明新增成分机制的存在。但在实际的研究中, ERP 机制的分析还会受到 α 阻断效应的干扰(Mazaheri & Picton, 2005; Mishra et al., 2012), 增加了区分 ERP 机制的难度。大量研究者使用了更多的方法来尝试区分 ERP 产生的机制(Becker, Ritter, & Villringer, 2008; Mazaheri & Jensen, 2006)。其他脑功能成像技术也能从探讨 ERP 产生的机制中获得启发, Fell (2007)指出为了进一步理解事件相关 EEG 和 fMRI 之间的关系, 将振幅和相位分离将是至关重要的步骤。

此外, 相位一致性还代表大脑认知加工过程的一些特点, 如有文献指出, α 活动的相位一致性指标标志着 α 活动相对于刺激输入的一种初始化, 能够增强刺激随后加工的强度(Hebert, Lehmann, Tan, Travis, & Arenander, 2005)。海马中振荡活动的相位锁定性还和工作记表现有关(Kleen et al., 2016)。

3.3 耦合(Coherence)

耦合是时频分析应用到EEG数据分析领域最广泛的指标之一。耦合是计算不同电极间同步活动的指标, 反映了认知加工过程中的一种整体网络功能(Bowyer, 2016; Cabral, Kringelbach, & Deco, 2014; Greenblatt, Pflieger, & Ossadtchi, 2012)。有多种不同的耦合指标, 如同频率信号相位之间的耦合(即相位同步性), 不同频率振幅/能量之间的耦合, 低频信号相位和高频信号能量之间的耦合等。这些耦合指标分别反应不同的神经网络活动特点(Lachaux, Rodriguez, Martinerie, & Varela, 1999; Siegel et al., 2008; Canolty et al., 2006; Canolty & Knight, 2010; Jensen, Bonnefond, & VanRullen, 2012; Penny et al., 2008)。本部分内容主要介绍同频率信号不同电极间的相位同步性以及低频相位和高频能量之间耦合的计算原理和心理意义。

3.3.1 不同电极同频率信号的相位同步性(Phase Synchrony)的计算原理

大脑加工信息以一种网络化的方式进行, 一个直接的证据就是相距较远的脑部区域间的脑电信号存在耦合。远距离电极间同频率信号的相位同步变化被称为相位同步性(Phase Synchrony, Lachaux et al., 1999), 是两个电极同频率信号对应试次间相位差恒定性程度的衡量。对应试次间的相位差越稳定, 相位同步性越好, 反之, 相位同步性越差。计算时, 需要计算出两电极对应试次对应时刻某频率的相位值, 然后相减。将此相位差异用复平面内的单位向量表示, 不同试次之间的相位差对应的单位向量的末端分布在单位圆上。如果相位差异接近恒定, 那么这些单位向量的平均向量的长度便会接近于 1; 反之, 相位差分布随机, 平均向量的长度便会接近于 0。平均向量的长度就是两电极相位同步性的指标。计算原理如图 8 所示。

3.3.2 相位同步性的心理学意义

相位同步性体现了长距离脑区的同步活动,

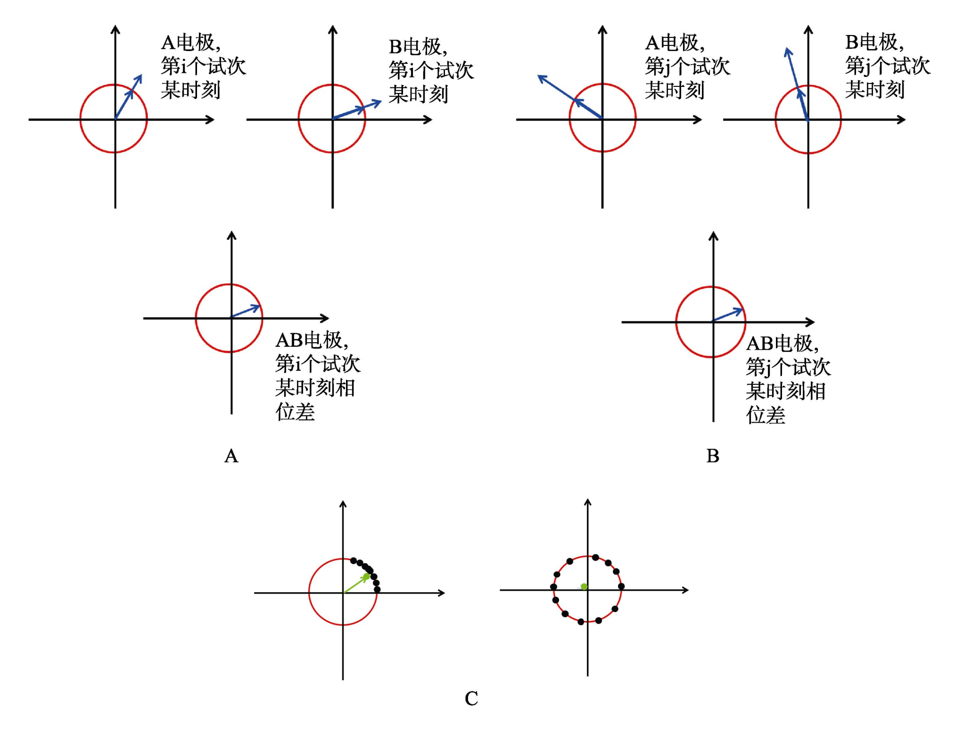


图 8　不同电极相位同步性计算原理示意图。A,上, 两个不同电极某试次某时刻各自的相位示意图, 下, 两个电极某试次某时刻的相位差; B,上, 两个不同电极另外一个试次某时刻(与 A 时刻相同)各自相位, 下, 两个电极该时刻相位差; C,左, 两电极不同试次某时刻相位差的分布靠近第一象限, 平均向量的模接近 1, 右, 两电极不同试次某时刻相位差均匀分布, 平均向量的模接近于 0。

反映了自下而上或者自上而下的信息传递和相互控制。有研究指出无论休息状态还是任务状态, 不同波段的相位同步性普遍存在于脑电活动中(Pockett, Bold, & Freeman, 2009)。Siegel 将长距离的相位同步性视为神经网络功能的一个标志(Siegel et al., 2008)。Finger 的研究也表明, 相位同步性可能是大脑将分散于不同区域的信息整合在一起形成一个整体的主要机制(Finger & König, 2014)。在一个需要左右大脑半球共同加工视觉信息形成整体知觉的研究中, 由小字母组成的大字母横跨左右视野, 在需要认出大字母的实验条件中, 左右半球电极间表现出了相位同步性的增加, 两个半球的信息得到了整合(Rose, Sommer, & Buchel, 2006)。老年人在多任务游戏中额中区和枕区的长距离 θ 相位耦合代表了高级脑区对低级脑区的认知控制(Anguera et al., 2013)。在关于注意的研究中, 发现不同脑区间的 γ 活动相位耦合与注意活动有关(Doesburg, Roggeveen, Kitajo, & Ward, 2008)。而一项研究则表明双任务中 α 活动相位同步性则是注意负载强弱的指示器(Kwon et al., 2015)。也有研究表明, α 相位同步性与认知任务的表现有关(Palva & Palva, 2011)。而 γ 活动同步性则还与对物体的意识相关(Castelhano, Rebola, Leitão, Rodriguez, & Castelo-Branco, 2013)。在视觉短时记忆中, 也发现了纹外皮层的 β 活动同步性指标与短时记忆保持的相关 (Tallon-Baudry, Bertrand, & Fischer, 2001)。此外, 相位同步性也是标记一些疾病的重要指标, 可能暗示着病人的神经网络功能的紊乱。一些研究表明癫痫病人发病的时候相位同步性会有一个很大的增长 (Franaszczuk & Bergey, 1999), 另外的研究也表明精神分裂症病人的 γ 同步性指标异常(Spencer et al., 2003)。这些不同的研究都说明相位同步性体现了大脑的各功能区联合为网络而显现出更高级的认知功能, 可以帮助人们完成复杂的认知任务。

3.3.3　低频信号相位和高频信号能量之间的耦合(Phase-Amplitude Coupling, PAC)的计算原理

有研究指出, 长距离脑区间的调控多借助于

低频振荡，而高频信号往往是局部活动的一种体现(Canolty & Knight, 2010)，低频和高频之间的耦合就具有了特殊的功能意义，局部脑加工体现局部的大脑的模块化加工，而与长距离的低频信号的耦合代表一种网络的信息整合。这种耦合在数据中表现为高频能量的高低起伏有一定的周期性，与信号中低频成分的相位变化相关(图 9A)。

这种耦合的计算方法有很多(Penny et al., 2008; Samiee & Baillet, 2017)，其中一些研究给出了一种相对灵敏的计算方法(Canolty et al., 2006; Song et al., 2014)。首先，计算出原信号中的高频信号(如 γ)的振幅 $amp_{\gamma}(t)$和低频信号(如 θ)的相位 $phase_{\theta}(t)$，每个对应时刻的高频能量和低频相位组成的复数 $amp_{\gamma}(t)\cdot e^{phase\theta(t)}$，在复平面内对应一个点(图 9B)，许多个时刻的点构成了一个分布(图 9C 和 9D)，如果复数点的分布偏向于一个象限，那么就说明高频能量多分布在某一个相位角内，两者有耦合(图 9C)，否则低频相位和高频能量则无耦合(图 9D)。实际计算时，还需要用置换检验(permutation test)的方法衡量耦合的相对强度(Canolty et al., 2006)：

3.3.4 低频相位高频能量耦合的心理学意义

低频相位和高频能量的耦合反映了多种认知机能，在不同的认知任务中都可能有相应表现。该耦合可能反映了这样的机制，将信息从大的行为反应时间尺度转移到局部的尺度，进行进一步的运算和突触修饰，从而整合多个时空尺度功能(Canolty & Knight, 2010; Jensen et al., 2012)。Bonnefond 等人关于 α 相位和 γ 能量的耦合研究说明信息自上而下的门控机制，局部的信息计算被约 100 ms 的时间周期门控控制，提供了周期性抑制的控制作用(Bonnefond & Jensen, 2015)；而在另外一项研究中，研究者使用了不同的行为任务，发现低频 θ 相位和高频 γ 能量的耦合模式直接和行为任务有关，在不同的行为任务中，表现出不同脑区间的耦合，说明进行不同任务时不同大脑区域之间的信息交流(Canolty et al., 2006)。认知任务中，高级脑区对低级脑区的认知控制可以体现

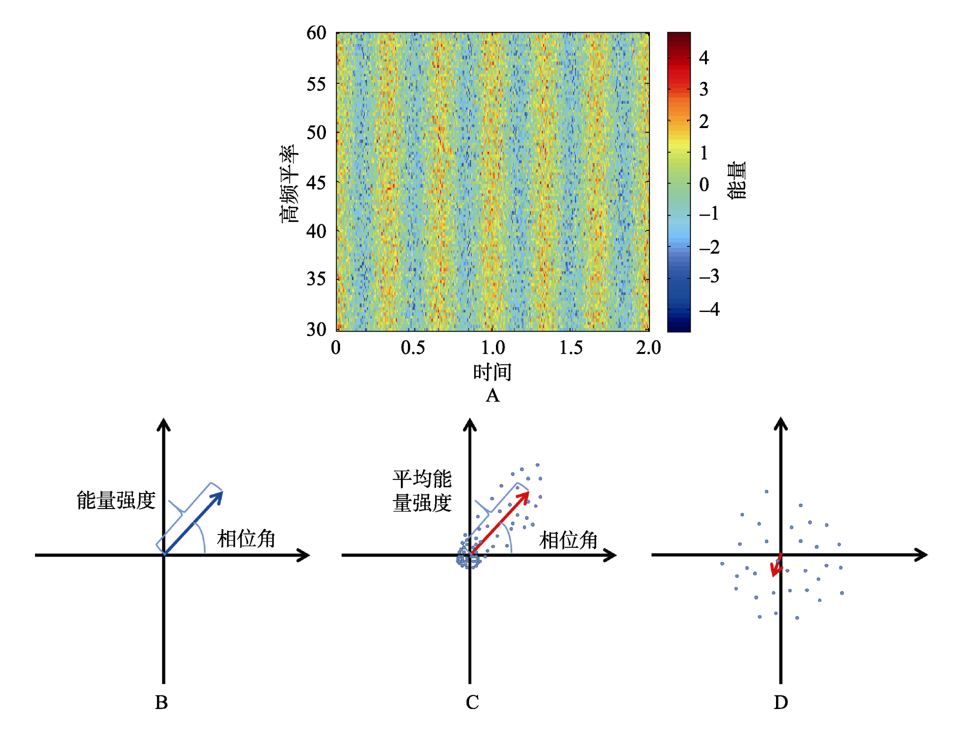


图 9 低频相位和高频能量耦合以及计算方法示意图。A 为耦合示意图，表现为高频能量以一定的低频周期振荡变化。B、C、D 为耦合计算原理示意图，B 为某个时刻高频能量和低频相位组成的复数在复平面上对应一个点；C 为许多时刻点的分布，偏向第一象限，平均复向量指向第一象限；D 为许多时刻点的分布，在四个象限均匀分布，平均向量长度很小，几乎为 0。

在高级脑区的低频振荡活动相位与低级脑区的高频振荡能量的耦合上(Helfrich & Knight, 2016)。不仅如此，在工作记忆任务中，长距离的低频相位(θ、α)和高频能量(β、γ)耦合以及长距离的低频相位的耦合反映了不同脑区之间的信息交流(Daume, Gruber, Engel, & Friese, 2017)。在一篇关于儿童工作记忆的研究中，研究者通过对儿童工作记忆的训练发现认知控制区域(额顶区)的 α 相位和低级脑区(颞区)的γ活动的耦合增强，提示了该类型的耦合在工作记忆中的作用(Barnes, Nobre, Woolrich, Baker, & Astle, 2016)。动物研究也表明海马记录到的低频 θ 和高频 γ 的耦合与学习和完成回忆任务有关(Tort, Komorowski, Manns, Kopell, & Eichenbaum, 2009)。还有文献指出低频相位和高频能量耦合在记忆中标志着编码的功能(Friese et al., 2013)。工作记忆中(短时记忆)的信息编码以及容量也可以用这类耦合解释(Axmacher et al., 2010)。最近的一项研究中，发现了慢波睡眠阶段的慢波振荡活动的相位与纺锤波之间的耦合在睡眠记忆巩固中有重要的作用，可以部分解释老年人记忆巩固能力的衰退(Helfrich, Mander, Jagust, Knight, & Walker, 2018)。

总的来说，低频相位和高频能量耦合是当前研究的一个热点，在不同任务以及不同状态都可以发现这样的活动模式，说明这种耦合反映了脑内不同大脑区域之间的信息交流以及信息控制，从而帮助被试完成各种高级认知任务，反映了大脑加工信息时的网络功能。

4 小结

时频分析是当前心理学脑电领域的一个热点算法应用。它可以帮助我们捕捉脑电信号中非相位锁定于事件发生时刻的活动，可以将事件诱发脑活动的探索拓展到刺激出现前。心理学脑电数据分析领域应用最多的时频分析算法是复 Morlet 小波变换和 Hilbert 变换。时频分析在脑电数据分析领域的应用主要体现在一些指标上。不同频段的能量指标反映了不同的认知过程，如 α 能量与选择性注意密切相关，而 γ 能量则与特征捆绑密切相关。相位一致性指标往往被用来探讨时域 ERP 成分产生的机制。耦合往往反映了大脑作为一个网络体现出来的整体功能，同频率远距离脑区之间的相位耦合和低频相位和高频能量的耦合是过去研究中的两个热点。未来可以关注时频分析技术在非任务态(静息态)中的应用以及其他耦合指标(如不同频段能量之间，不同频段相位之间)在探索心理过程中的应用。

参考文献

Allen, J. B. (1977). Short term spectral analysis, synthesis, and modification by discrete fourier transform. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ASSP-25*(3), 235–238.

Anguera, J. A., Boccanfuso, J., Rintoul, J. L., Al-Hashimi, O., Faraji, F., Janowich, J., ... Gazzaley, A. (2013). Video game training enhances cognitive control in older adults. *Nature, 501*(7465), 97–101.

Axmacher, N., Henseler, M. M., Jensen, O., Weinreich, I., Elger, C. E., & Fell, J. (2010). Cross-frequency coupling supports multi-item working memory in the human hippocampus. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 107*(7), 3228–3233.

Bai, O., Lin, P., Vorbach, S., Floeter, M. K., Hattori, N., & Hallett, M. (2008). A high performance sensorimotor beta rhythm-based brain-computer interface associated with human natural motor behavior. *Journal of Neural Engineering, 5*(1), 24–35.

Barnes, J. J., Nobre, A. C., Woolrich, M. W., Baker, K., & Astle, D. E. (2016). Training working memory in childhood enhances coupling between frontoparietal control network and task-related regions. *Journal of Neuroscience, 36*(34), 9001–9011.

Bastiaansen, M., Mazaheri, A., & Jensen, O. (2012). Beyond ERPs: Oscillatory neuronal dynamics. In S. J. Luck & E. S. Kappenman (Eds.), *The Oxford handbook of event-related potential components* (pp. 31–50). New York: NY: Oxford University Press.

Becker, R., Ritter, P., & Villringer, A. (2008). Influence of ongoing alpha rhythm on the visual evoked potential. *Neuroimage, 39*(2), 707–716.

Berger, H. (1929). Über das Elektrenkephalogramm des Menschen. *Archiv für Psychiatrie und Nervenkrankheiten, 87*, 527–570.

Bernardino, A., & Santos-Victor, J. (2005). A real-time gabor primal sketch for visual attention. In J. S. Marques, N. Pérez de la Blanca, & P. Pina (Eds.), *Pattern recognition and image analysis. IbPRIA 2005. Lecture notes in computer science, vol 3522* (pp. 335–342). Berlin, Heidelberg: Springer.

Bonnefond, M., & Jensen, O. (2015). Gamma activity

coupled to alpha phase as a mechanism for top-down controlled gating. *PLoS One, 10*(6), e0128667.

Bowyer, S. M. (2016). Coherence a measure of the brain networks: Past and present. *Neuropsychiatric Electrophysiology, 2*, 1.

Bruns, A. (2004). Fourier-, Hilbert- and wavelet-based signal analysis: Are they really different approaches? *Journal of Neuroscience Methods, 137*(2), 321–332.

Busch, N., A., Dubois, J., & VanRullen, R. (2009). The phase of ongoing EEG oscillations predicts visual perception. *Journal of Neuroscience, 29*(24), 7869–7876.

Busch, N. A., Herrmann, C. S., Müller, M. M., Lenz, D., & Gruber, T. (2006). A cross-laboratory study of event-related gamma activity in a standard object recognition paradigm. *Neuroimage, 33*(4), 1169–1177.

Cabral, J., Kringelbach, M., L., & Deco, G. (2014). Exploring the network dynamics underlying brain activity during rest. *Progress in Neurobiology, 114*, 102–131.

Canolty, R. T., Edwards, E., Dalal, S. S., Soltani, M., Nagarajan, S. S., Kirsch, H. E., ... Knight, R. T. (2006). High gamma power is phase-locked to theta oscillations in human neocortex. *Science, 313*(5793), 1626–1628.

Canolty, R. T., & Knight, R. T. (2010). The functional role of cross-frequency coupling. *Trends in Cognitive Sciences, 14*(11), 506–515.

Capilla, A., Schoffelen, J. M., Paterson, G., Thut, G., & Gross, J. (2014). Dissociated α-band modulations in the dorsal and ventral visual pathways in visuospatial attention and perception. *Cerebral Cortex, 24*, 550–561.

Castelhano, J., Rebola, J., Leitão, B., Rodriguez, E., & Castelo-Branco, M. (2013). To perceive or not perceive: The role of gamma-band activity in signaling object percepts. *PLoS One, 8*(6), e66363.

Cavanagh, J. F., Cohen, M. X., & Allen, J. J. B. (2009). Prelude to and resolution of an error: EEG phase synchrony reveals cognitive control dynamics during action monitoring. *Journal of Neuroscience, 29*(1), 98–105.

Cavanagh, J. F., Frank, M. J., Klein, T. J., & Allen, J. J. B. (2010). Frontal theta links prediction errors to behavioral adaptation in reinforcement learning. *NeuroImage, 49*(4), 3198–3209.

Daume, J., Gruber, T., Engel, A. K., & Friese, U. (2017). Phase-amplitude coupling and long-range phase synchronization reveal frontotemporal interactions during visual working memory. *Journal of Neuroscience, 37*(2), 313–322.

de Lange, F. P., Jensen, O., Bauer, M., & Toni, I. (2008). Interactions between posterior gamma and frontal alpha/beta oscillations during imagined actions. *Frontiers in Human Neuroscience, 2*, 7.

Deiber, M. P., Ibañez, V., Missonnier, P., Rodriguez, C., & Giannakopoulos, P. (2013). Age-associated modulations of cerebral oscillatory patterns related to attention control. *NeuroImage, 82*, 531–546.

Doesburg, S. M., Roggeveen, A. B., Kitajo, K., & Ward, L. M. (2008). Large-scale gamma-band phase synchronization and selective attention. *Cerebral Cortex, 18*(2), 386–396.

Engel, A. K., & Fries, P. (2010). Beta-band oscillations--signalling the status quo? *Current Opinion in Neurobiology, 20*(2), 156–165.

Fell, J. (2007). Cognitive neurophysiology: Beyond averaging. *NeuroImage, 37*(4), 1069–1072.

Finger, H., & König, P. (2014). Phase synchrony facilitates binding and segmentation of natural images in a coupled neural oscillator network. *Frontiers in Computational Neuroscience, 7*, 195.

Franaszczuk, P. J., & Bergey, G. K. (1999). An autoregressive method for the measurement of synchronization of interictal and ictal EEG signals. *Biological Cybernetics, 81*, 3–9.

Friese, U., Köster, M., Hassler, U., Martens, U., Trujillo-Barreto, N., & Gruber, T. (2013). Successful memory encoding is associated with increased cross-frequency coupling between frontal theta and posterior gamma oscillations in human scalp-recorded EEG. *NeuroImage, 66*, 642–647.

Fu, K.-M. G., Foxe, J. J., Murray, M. M., Higgins, B. A., Javitt, D. C., & Schroeder, C. E. (2001). Attention-dependent suppression of distracter visual input can be cross-modally cued as indexed by anticipatory parieto-occipital alpha-band oscillations. *Cognitive Brain Research, 12*, 145–152.

Goffaux, V., Mouraux, A., Desmet, S., & Rossion, B. (2004). Human non-phase-locked gamma oscillations in experience-based perception of visual scenes. *Neuroscience Letters, 354*(1), 14–17.

Gola, M., Magnuski, M., Szumska, I., & Wróbel, A. (2013). EEG beta band activity is related to attention and attentional deficits in the visual performance of elderly subjects. *International Journal of Psychophysiology, 89*(3), 334–341.

Greenblatt, R. E., Pflieger, M. E., & Ossadtchi, A. E. (2012). Connectivity measures applied to human brain electrophysiological data. *Journal of Neuroscience Methods, 207*(1), 1–16.

Gruber, T., & Müller, M. M. (2005). Oscillatory brain activity dissociates between associative stimulus content

in a repetition priming task in the human EEG. *Cerebral Cortex, 15*(1), 109–116.

Gruber, T., Trujillo-Barreto, N. J., Giabbiconi, C. M., Valdés-Sosa, P. A., & Müller, M. M. (2006). Brain electrical tomography (BET) analysis of induced gamma band responses during a simple object recognition task. *NeuroImage, 29*(3), 888–900.

Händel, B. F., Haarmeier, T., & Jensen, O. (2011). Alpha oscillations correlate with the successful inhibition of unattended stimuli. *Journal of Cognitive Neuroscience, 23*, 2494–2502.

Hanslmayr, S., Gross, J., Klimesch, W., & Shapiro, K. L. (2011). The role of alpha oscillations in temporal attention. *Brain Research Reviews, 67*, 331–343.

Hassler, U., Barreto, N. T., & Gruber, T. (2011). Induced gamma band responses in human EEG after the control of miniature saccadic artifacts. *NeuroImage, 57*(4), 1411–1421.

Hassler, U., Friese, U., Martens, U., Trujillo-Barreto, N., & Gruber, T. (2013). Repetition priming effects dissociate between miniature eye movements and induced gamma-band responses in the human electroencephalogram. *European Journal of Neuroscience, 38*(3), 2425–2433.

Hebert, R., Lehmann, D., Tan, G., Travis, F., & Arenander, A. (2005). Enhanced EEG alpha time-domain phase synchrony during Transcendental Meditation: Implications for cortical integration theory. *Signal Processing, 85*(11), 2213–2232.

Helfrich, R., F., & Knight, R., T. (2016). Oscillatory dynamics of prefrontal cognitive control. *Trends in Cognitive Sciences, 20*(12), 916–930.

Helfrich, R. F., Mander, B. A., Jagust, W. J., Knight, R. T., & Walker, M. P. (2018). Old brains come uncoupled in sleep: Slow wave-spindle synchrony, brain atrophy, and forgetting. *Neuron, 97*(1), 221–230.e4.

Huang, N. E., Shen, Z., Long, S. R., Wu, M. C., Shin, H. H., Zheng, Q., ... Liu, H. H. (1998). The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 454*, 903–995.

Ijspeert, A. J. (2008). Central pattern generators for locomotion control in animals and robots: A review. *Neural Networks, 21*(4), 642–653.

Jensen, O., Bonnefond, M., & VanRullen, R. (2012). An oscillatory mechanism for prioritizing salient unattended stimuli. *Trends in Cognitive Sciences, 16*(4), 200–206.

Kelly, S. P., Gomez-Ramirez, M., & Foxe, J. J. (2009). The strength of anticipatory spatial biasing predicts target discrimination at attended locations: A high-density EEG study. *European Journal of Neuroscience, 30*, 2224–2234.

Kelly, S. P., Lalor, E. C., Reilly, R. B., & Foxe, J. J. (2006). Increases in alpha oscillatory power reflect an active retinotopic mechanism for distracter suppression during sustained visuospatial attention. *Journal of Neurophysiology, 95*(6), 3844–3851.

Keren, A. S., Yuval-Greenberg, S., & Deouell, L. Y. (2010). Saccadic spike potentials in gamma-band EEG: Characterization, detection and suppression. *NeuroImage, 49*(3), 2248–2263.

Kharate, G. K., Patil, V. H., & Bhale, N. L. (2007). Selection of mother wavelet for image compression on basis of nature of image. *Journal of Multimedia, 2*(6), 44–51.

Kleen, J. K., Testorf, M. E., Roberts, D. W., Scott, R. C., Jobst, B. J., Holmes, G. L., & Lenck-Santini, P.-P. (2016). Oscillation phase locking and late ERP components of intracranial hippocampal recordings correlate to patient performance in a working memory task. *Frontiers in Human Neuroscience, 10*, 287.

Klimesch, W. (1999). EEG alpha and theta oscillations reflect cognitive and memory performance: A review and analysis. *Brain Research Reviews, 29*(2–3), 169–195.

Klimesch, W. (2012). alpha-band oscillations, attention, and controlled access to stored information. *Trends in Cognitive Sciences, 16*(12), 606–617.

Klimesch, W., Schack, B., Schabus, M., Doppelmayr, M., Gruber, W., & Sauseng, P. (2004). Phase-locked alpha and theta oscillations generate the P1–N1 complex and are related to memory performance. *Cognitive Brain Research, 19*(3), 302–316.

Knakker, B., Weiss, B., & Vidnyánszky, Z. (2015). Object-based attentional selection modulates anticipatory alpha oscillations. *Frontiers in Human Neuroscience, 8*, 1048.

Kwon, G., Kim, M.-Y., Lim, S., Kwon, H., Lee, Y.-H., Kim, K., ... Suh, M. (2015). Frontoparietal EEG alpha-phase synchrony reflects differential attentional demands during word recall and oculomotor dual-tasks. *NeuroReport, 26*(18), 1161–1167.

Lachaux, J. P., Rodriguez, E., Martinerie, J., & Varela, F. J. (1999). Measuring phase synchrony in brain signals. *Human Brain Mapping, 8*(4), 194–208.

Lee, D. T. L., & Yamamoto, A. (1994). Wavelet analysis: Theory and applications. *Hewlett-Packard Journal, 45*, 44–54.

Lieuw, I. (2015). Time frequency analysis of neural oscillations in multi-attribute decision-making. *Scripps senior theses*, Paper 556.

Luck, S. J. (2005). *An introduction to the event-related*

potential technique. Cambridge: MIT Press.

Makeig, S., Westerfield, M., Jung, T. P., Enghoff, S., Townsend, J., Courchesne, E., & Sejnowski, T. J. (2002). Dynamic brain sources of visual evoked responses. *Science, 295*(5555), 690–694.

Makin, A. D. J., Ackerley, R., Wild, K., Poliakoff, E., Gowen, E., & El-Deredy, W. (2011). Coherent illusory contours reduce microsaccade frequency. *Neuropsychologia, 49*(9), 2798–2801.

Mäkinen, V., Tiitinen, H., & May, P. (2005). Auditory event-related responses are generated independently of ongoing brain activity. *NeuroImage, 24*(4), 961–968.

Marshall, T. R., O'Shea, J., Jensen, O., & Bergmann, T. O. (2015). Frontal eye fields control attentional modulation of alpha and gamma oscillations in contralateral occipitoparietal cortex. *Journal of Neuroscience, 35*, 1638–1647.

Martinovic, J., Gruber, T., & Müller, M. M. (2007). Induced gamma band responses predict recognition delays during object identification. *Journal of Cognitive Neuroscience, 19*(6), 921–934.

Mathewson, K. E., Gratton, G., Fabiani, M., Beck, D. M., & Ro, T. (2009). To see or not to see: Prestimulus α phase predicts visual awareness. *Journal of Neuroscience, 29*(9), 2725–2732.

Mazaheri, A., & Jensen, O. (2006). Posterior α activity is not phase-reset by visual stimuli. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 103*(8), 2948–2952.

Mazaheri, A., & Picton, T. W. (2005). EEG spectral dynamics during discrimination of auditory and visual targets. *Cognitive Brain Research, 24*(1), 81–96.

Mishra, J., Martínez, A., Schroeder, C. E., & Hillyard, S. A. (2012). Spatial attention boosts short-latency neural responses in human visual cortex. *NeuroImage, 59*(2), 1968–1978.

Morgan, H. M., Muthukumaraswamy, S. D., Hibbs, C. S., Shapiro, K. L., Bracewell, R. M., Singh, K. D., & Linden, D. E. J. (2011). Feature integration in visual working memory: Parietal gamma activity is related to cognitive coordination. *Journal of Neurophysiology, 106*(6), 3185–3194.

Muthukumaraswamy, S. D. (2013). High-frequency brain activity and muscle artifacts in MEG/EEG: A review and recommendations. *Frontiers in Human Neuroscience, 7*, 138.

Neural oscillation. (2018, January 5). In *Wikipedia, the free encyclopedia.* Retrieved January 24, 2018, from https://en.wikipedia.org/wiki/Neural_oscillation

Ngui, W. K., Leong, M. S., Hee, L. M., & Abdelrhman, A. M. (2013). Wavelet analysis: Mother wavelet selection methods. *Applied Mechanics and Materials, 393*, 953–958.

Nobach, H., Tropea, C., Cordier, L., Bonnet, J.-P., Delville, J., Lewalle, J., ... Adrian, R. (2007). Review of some fundamentals of data processing. In C. Tropea, A. L. Yarin, & J. F. Foss (Eds.), *Springer handbook of experimental fluid mechanics* (pp. 1337–1398). Berlin, Heidelberg: Springer.

Norcia, A. M., Appelbaum, L. G., Ales, J. M., Cottereau, B. R., & Rossion, B. (2015). The steady-state visual evoked potential in vision research: A review. *Journal of Vision, 15*(6), 4.

Palva, S., & Palva, J. M. (2011). Functional roles of alpha-band phase synchronization in local and large-scale cortical networks. *Frontiers in Psychology, 2*, 204.

Pampu, N. C. (2011). Study of effects of the short time fourier transform configuration on EEG spectral estimates. *Acta Technica Napocensis: Electronics and Telecommunications, 52*, 26–29.

Penny, W. D., Duzel, E., Miller, K. J., & Ojemann, J. G. (2008). Testing for nested oscillation. *Journal of Neuroscience Methods, 174*(1), 50–61.

Pockett, S., Bold, G. E. J., & Freeman, W. J. (2009). EEG synchrony during a perceptual-cognitive task: Widespread phase synchrony at all frequencies. *Clinical Neurophysiology, 120*(4), 695–708.

Regan, D. (1966). Some characteristics of average steady-state and transient responses evoked by modulated light. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology, 20*(3), 238–248.

Rihs, T. A., Michel, C. M., & Thut, G. (2007). Mechanisms of selective inhibition in visual spatial attention are indexed by α-band EEG synchronization. *European Journal of Neuroscience, 25*(2), 603–610.

Roach, B. J., & Mathalon, D. H. (2008). Event-related EEG time-frequency analysis: An overview of measures and an analysis of early gamma band phase locking in schizophrenia. *Schizophrenia Bulletin, 34*(5), 907–926.

Rose, M., Sommer, T., & Büchel, C. (2006). Integration of local features to a global percept by neural coupling. *Cerebral Cortex, 16*(10), 1522–1528.

Rossion, B., Prieto, E. A., Boremanse, A., Kuefner, D., & van Belle, G. (2012). A steady-state visual evoked potential approach to individual face perception: Effect of inversion, contrast-reversal and temporal dynamics. *NeuroImage, 63*(3), 1585–1600.

Samiee, S., & Baillet, S. (2017). Time-resolved phase-

amplitude coupling in neural oscillations. *NeuroImage, 159*, 270–279.

Sauseng, P., Klimesch, W., Stadler, W., Schabus, M., Doppelmayr, M., Hanslmayr, S., ... Birbaumer, N. (2005). A shift of visual spatial attention is selectively associated with human EEG alpha activity. *European Journal of Neuroscience, 22*(11), 2917–2926.

Selesnick, I. W. (2011). Wavelet transform with tunable Q-factor. *IEEE Transactions on Signal Processing, 59*(8), 3560–3575.

Sharma, A., & Singh, M. (2015). Assessing alpha activity in attention and relaxed state: An EEG analysis. In *2015 1st international conference on next generation computing technologies* (pp. 508–513). Dehradun: IEEE.

Siegel, M., Donner, T. H., Oostenveld, R., Fries, P., & Engel, A. K. (2008). Neuronal synchronization along the dorsal visual pathway reflects the focus of spatial attention. *Neuron, 60*(4), 709–719.

Snyder, A. C., & Foxe, J. J. (2010). Anticipatory attentional suppression of visual features indexed by oscillatory alpha-band power increases: A high-density electrical mapping study. *Journal of Neuroscience, 30*(11), 4024–4032.

Song, K., Meng, M., Chen, L., Zhou, K., & Luo, H. (2014). Behavioral oscillations in attention: Rhythmic α pulses mediated through θ band. *Journal of Neuroscience, 34*(14), 4837–4844.

Spencer, K. M., Nestor, P. G., Niznikiewicz, M. A., Salisbury, D. F., Shenton, M. E., & McCarley, R. W. (2003). Abnormal neural synchrony in schizophrenia. *Journal of Neuroscience, 23*(19), 7407–7411.

Störmer, V., Feng, W. F., Martinez, A., McDonald, J. J., & Hillyard, S. A. (2016). Salient, irrelevant sounds reflexively induce alpha rhythm desynchronization in parallel with slow potential shifts in visual cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience, 28*(3), 433–445.

Tallon-Baudry, C. (2009). The roles of gamma-band oscillatory synchrony in human visual cognition. *Frontiers in Bioscience, 14*, 321–332.

Tallon-Baudry, C., & Bertrand, O. (1999). Oscillatory gamma activity in humans and its role in object representation. *Trends in Cognitive Sciences, 3*(4), 151–162.

Tallon-Baudry, C., Bertrand, O., & Fischer, C. (2001). Oscillatory synchrony between human extrastriate areas during visual short-term memory maintenance. *Journal of Neuroscience, 21*, RC177.

Thut, G., Nietzel, A., Brandt, S. A., & Pascual-Leone, A. (2006). α-band electroencephalographic activity over occipital cortex indexes visuospatial attention bias and predicts visual target detection. *Journal of Neuroscience, 26*(37), 9494–9502.

Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society, 79*(1), 61–78.

Tort, A. B. L., Komorowski, R. W., Manns, J. R., Kopell, N. J., & Eichenbaum, H. (2009). Theta-gamma coupling increases during the learning of item-context associations. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 106*(49), 20942–20947.

Tseng, P., Chang, Y. T., Chang, C. F., Liang, W. K., & Juan, C. H. (2016). The critical role of phase difference in gamma oscillation within the temporoparietal network for binding visual working memory. *Scientific Reports, 6*, 32138.

Uusberg, A., Uibo, H., Kreegipuu, K., & Allik, J. (2013). EEG alpha and cortical inhibition in affective attention. *International Journal of Psychophysiology, 89*(1), 26–36.

Valipour, S., Shaligram, A. D., & Kulkarni, G. R. (2013). Spectral analysis of EEG signal for detection of alpha rhythm with open and closed eyes. *International Journal of Engineering and Innovative Technology, 3*(6), 1–4.

van Gerven, M., & Jensen, O. (2009). Attention modulations of posterior alpha as a control signal for two-dimensional brain–computer interfaces. *Journal of Neuroscience Methods, 179*, 78–84.

Vidakovic, B., & Mueller, P. (1991). Wavelets for kids: A tutorial introduction. Duke University.

Waldert, S., Preissl, H., Demandt, E., Braun, C., Birbaumer, N., Aertsen, A., & Mehring, C. (2008). Hand movement direction decoded from MEG and EEG. *Journal of Neuroscience, 28*(4), 1000–1008.

Womelsdorf, T., Johnston, K., Vinck, M., & Everling, S. (2010). Theta-activity in anterior cingulate cortex predicts task rules and their adjustments following errors. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 107*(11), 5248–5253.

Woodman, G. F. (2010). A brief introduction to the use of event-related potentials in studies of perception and attention. *Attention, Perception, & Psychophysics, 72*(8), 2031–2046.

Worden, M. S., Foxe, J. J., Wang, N., & Simpson, G. V. (2000). Anticipatory biasing of visuospatial attention indexed by retinotopically specific α-band electroencephalography increases over occipital cortex. *The Journal of Neuroscience, 20*, RC63.

Yuval-Greenberg, S., Tomer, O., Keren, A. S., Nelken, I., & Deouell, L. Y. (2008). Transient induced gamma-band response in EEG as a manifestation of miniature saccades. *Neuron, 58*(3), 429–441.

Application of time-frequency analysis in investigating non-phase locked components of EEG

WU Xia; ZHONG Chupeng; DING Yulong; QU Zhe

(*Department of psychology, Sun Yat-sen University, Guangzhou* 510006, *China*)

Abstract: Since the introduction of the time-frequency analysis technique into the field of EEG data in the 1980's, researchers can excavate non-phase locked components in EEG signals, overcoming the previous shortcomings of traditional ERP methods. In the field of psychology, the two most commonly used time-frequency analysis methods are wavelet transform and Hilbert transform. Power, phase locking index (PLI), and coherence are three important indices of time-frequency analysis. Power in different frequency band is typically considered to reflect different mental processes. For example, α power is frequently related to selective attention, while γ energy is often associated with feature binding. Researchers use PLI to investigate the mechanism generated by an ERP component. Coherence indicates the exchange of information between long-distance brain regions and cognitive control of higher-level brain regions in the low-level brain regions, which show different patterns in various complex cognitive tasks.

Key words: time-frequency analysis; wavelet transform; Hilbert transform; power; PLI; coherence